

## Beschreibung

### Verfahren zur Vorfilterung von Trainingssequenzen in einem Funkkommunikationssystem

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Vorfilterung von Trainingssequenzen in einem Funkkommunikationssystem, bei dem zumindest sendeseitig eine aus mehreren Antennensystemen bestehende Antennenanordnung verwendet wird.

Bei Funkkommunikationssystemen, wie beispielsweise bei Mobilfunksystemen, werden zur Steigerung einer Datenübertragungskapazität sowohl sendeseitig als auch empfangsseitig jeweils aus mehreren Antennensystemen bestehende Antennenanordnungen verwendet. Derartige Funkkommunikationssysteme werden als sogenannte "Multiple Input Multiple Output", kurz "MIMO", Funkkommunikationssysteme bezeichnet.

Mit Hilfe spezieller Signalverarbeitungsalgorithmen wird ein digitaler Eingangsdatenstrom in Teildatenströme aufgeteilt und über die sendeseitigen Antennensysteme abgestrahlt. Aufgrund der räumlich angeordneten Antennensysteme sind räumliche Funkkanalkoeffizienten ableitbar, die Eigenschaften von Funkübertragungskanälen repräsentieren. Die Funkkanalkoeffizienten beschreiben beispielsweise einen Signalschwund (Fading), eine spezifische Ausbreitung, eine Dämpfung, Störungen, usw., im Funkübertragungskanal.

Die Funkkanalkoeffizienten werden beispielsweise sendeseitig für die Vorfilterung der Teildatenströme verwendet, um diese im Hinblick auf einen erhöhten Datendurchsatz oder im Hinblick auf eine erhöhte Übertragungsqualität optimal an die Funkübertragung anzupassen. Beispielsweise wird durch die Vorfilterung für jeden Teildatenstrom eine individuelle Sendeleistungsanpassung und/oder eine individuelle Modulation durchgeführt.

- Die Funkkanalkoeffizienten sind bei einem MIMO-Funkkommunikationssystem nur sehr aufwändig mit Hilfe einer Kanalschätzung zu ermitteln. So ergeben sich bei einer Anzahl von  $M_{TX}$  Sendeantennen und bei einer Anzahl von  $M_{RX}$  Empfangsantennen insgesamt  $M_{RX} \times M_{TX}$  zu schätzende Funkkanalkoeffizienten für  $M_{RX} \times M_{TX}$  Funkübertragungskanäle. Konkret ergeben sich für ein MIMO-Funkkommunikationssystem mit vier Sende- und mit vier Empfangsantennensystemen insgesamt 16 Funkübertragungskanäle, die durch 16 Funkkanalkoeffizienten beschrieben werden.
- Eine genaue Schätzung der Funkkanalkoeffizienten bedingt insbesondere bei einem FDD-Funkkommunikationssystem („Frequency Division Duplex“, FDD) Trainingssequenzen großer Länge, die wiederum eine beträchtliche Anzahl von Funkübertragungsressourcen belegen.
- Es ist deshalb Aufgabe der Erfindung, in einem Funkkommunikationssystem, insbesondere in einem MIMO-Funkkommunikationssystem, eine aufwandsarme bzw. eine bezüglich der Genauigkeit verbesserte Schätzung von Funkkanalkoeffizienten zu realisieren.
- Die Aufgabe der Erfindung wird durch die Merkmale des Patentanspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den Unteransprüchen angegeben.
- Ein erfindungsgemäße Vorfilter wird sendeseitig vor einer Antennenanordnung derart angeordnet, dass Trainingssequenzen über das Vorfilter an Antennensysteme der Antennenanordnung zur Abstrahlung zugeführt werden. Anhand der Trainingssequenzen erfolgt eine Kanalschätzung zur Ermittlung von Funkübertragungskanaleigenschaften, die durch räumliche Korrelationen beschrieben werden. Das Vorfilter wird in Abhängigkeit der räumlichen Korrelationen derart dimensioniert, dass ein vorgegebener Fehlerwert eines empfangsseitig zur Kanalschätzung verwendeten Algorithmus erzielt wird.

Dieser empfangsseitige Fehlerwert ist beispielsweise als zu minimierender Fehlerwert vorgegeben oder es soll ein vorgegebener Fehlerwert mittels einer Variation der Länge der Trainingssequenzen erzielt werden.

5

Die Funkübertragungskanaleigenschaften werden empfangsseitig mit Hilfe der Trainingssequenzen geschätzt und an die Sendeseite zur Dimensionierung des Vorfilters übermittelt. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn in Aufwärtsrichtung (Uplink) und in Abwärtsrichtung (Downlink) verschiedene Trägerfrequenzen zur Funkübertragung verwendet werden.

Oder aber die Funkübertragungskanaleigenschaften werden sendeseitig in Abhängigkeit von einem verwendeten Übertragungsverfahren bestimmt. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn in Aufwärtsrichtung (Uplink) von einer Mobilstation zu einer Basisstation und in Abwärtsrichtung (Downlink) von einer Basisstation zu einer Mobilstation verschiedene Zeitschlitze einer Trägerfrequenz zur Funkübertragung verwendet werden. Da sich in diesem Fall die Funkübertragungskanaleigenschaften in Aufwärtsrichtung und in Abwärtsrichtung im wesentlichen nicht unterscheiden, sind die Funkübertragungskanaleigenschaften seitens der Basisstation aus der Aufwärtsrichtung direkt bestimmbar und stehen somit sendeseitig an der Basisstation unmittelbar zur Verfügung.

Durch das erfindungsgemäß gestaltete Vorfilter wird im Vergleich zu einem Funkkommunikationssystem ohne Vorfilterung eine Verbesserung der Kanalschätzung erzielt. Insbesondere bei einem empfangsseitig verwendeten Algorithmus zur Bildung eines mittleren quadratischen Fehlerwerts ("Mean Squared Error"), kurz MSE-Algorithmus, wird die Verbesserung in Hinsicht auf den mittleren quadratischen Fehler erzielt. Weiterhin wird eine Verwendung von verkürzten Trainingssequenzen unter Einhaltung eines vorgegebenen Fehlerwerts ermöglicht.

Dadurch, dass mit Hilfe des erfindungsgemäßen Vorfilters die Trainingssequenzen bei einem vorgegebenen Fehlerwert verkürzt werden können, werden Funkübertragungsressourcen eingespart, die vorteilhaft für eine Nutzdatenübertragung ("Payload") zur Verfügung stehen.

Die Schätzung der Funkkanalkoeffizienten wird im Aufwand reduziert und vereinfacht, da einerseits zur Vorfilterung bzw. zur Kanalschätzung lediglich statische, langzeitstabile Informationen bezüglich der räumlichen Korrelationsverhältnisse für jeden Funkübertragungskanal bzw. für jedes Antennensystem verwendet werden. Andererseits werden durch Verwendung von verkürzten Trainingssequenzen die zur Kanalschätzung durchzuführenden Berechnungen im Aufwand reduziert.

Die Dimensionierung des Vorfilters ist aufgrund der lediglich langsam erfolgenden Änderung der Funkkanalkoeffizienten besonders vorteilhaft nur in größeren Zeitabständen durchzuführen.

Bei der Schätzung der Funkkanalkoeffizienten werden Einflüsse auf den Funkübertragungskanal, wie beispielsweise Schwund („Fading“), berücksichtigt.

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Vorfilterung ist neben den MIMO-Funkkommunikationssystemen auch bei so genannten "Multiple-Input-Single-Output", kurz "MISO", Funkkommunikationssystemen einsetzbar.

Bei einem MISO-Funkkommunikationssystem werden sendeseitig eine Vielzahl von Sendeantennensystemen, die gegebenenfalls als intelligente Antennenanordnung, auch bekannt als "Smart Antenna", betrieben werden, verwendet, während empfangsseitig lediglich ein einzelnes Antennensystem angeordnet ist.

Das erfindungsgemäße Verfahren verwendet vorteilhaft die Erkenntnis, dass bei einer typischen Freiraumausbreitung die

Funkübertragungskanäle bzw. die den Funkübertragungskanälen jeweils zugeordneten Sende- bzw. Empfangsantennensysteme zueinander räumlich korreliert sind. Dabei sind insbesondere bei einer direkten freien Sichtverbindung ("Line of Sight")  
5 die Funkkanalkoeffizienten genau zu bestimmen, da sie sich lediglich über einen längeren Beobachtungszeitraum ändern.

Zum besseren Verständnis der Erfindung wird nachfolgend ein typisches MIMO-Funkkommunikationssystem in allgemeiner Form  
10 beispielhaft dargestellt.

FIG 1 zeigt ein Blockschaltbild eines MIMO-Funkkommunikationssystems. Ein digitales Eingangssignal IN, das seriell aufeinanderfolgende Bits aufweist, gelangt sendeseitig an einen Seriell/Parallel-Wandler SPW, mit dessen Hilfe das Eingangssignal IN in insgesamt MT Datenfolgen D11, D12, ..., D1MT für MT sendeseitige Subkanäle SU11, SU12, ..., SU1MT aufgeteilt wird. Jeder einzelne der MT sendeseitigen Subkanäle SU11 bis SU1MT weist zur Modulation der einzelnen Datenfolgen D11 bis D1MT jeweils einen Modulator QMOD auf, wobei  
20 hier die Datenfolgen D11 bis D1MT mit Hilfe eines identischen Modulationsverfahrens moduliert werden.

Modulierte Datenfolgen DM11, DM12, ..., DM1MT gelangen über ein Vorfilter FS zur Abstrahlung an eine sendeseitige Antenneneinrichtung ANT1Z, die insgesamt MZ einzelne Antennensysteme A11, A12, ..., A1MZ aufweist. Mit Hilfe einer empfangsseitigen Antenneneinrichtung ANT2Z, die insgesamt MR einzelne Antennensysteme A21, A22, ..., A2MR aufweist, werden MR Datenfolgen DZ21, DZ22, ..., DZ2MR empfangen. Diese weisen jeweils einen Rauschanteil auf, der durch einen Rauschvektor  $n$  dargestellt ist.  
30

Die MR Datenfolgen DZ21 bis DZ2MR gelangen an ein Matrixfilter GE, das MT Datenfolgen D21, D22, ..., D2MT für MT empfangsseitige Subkanäle SU21, SU22, ..., SU2MT bildet. Die Datenfolgen D21 bis D2MT gelangen an einen Parallel/Seriell-

35

Wandler PSW, der ein Ausgangssignal OUT mit seriell aufeinanderfolgenden Bits bildet. Die Eigenschaften der Übertragungskanäle sind als Funkkanalkoeffizienten in einer Matrix zusammenfassbar.

5

Im Folgenden wird die erfindungsgemäße Vorfilterung beispielhaft für einen empfangsseitig eingesetzten Algorithmus zur Bildung eines minimalen mittleren quadratischen Fehlerwerts ("Minimum Mean Squared Error"), kurz MMSE-Algorithmus, hergeleitet.

10

Es wird vorausgesetzt, dass die sendeseitigen Trainingssequenzen orthogonal zueinander dem sendeseitigen Vorfilter zur Vorverarbeitung zugeführt werden.

15

Nachfolgend gelten folgende Abkürzungen:

I	bezeichnet eine Einheitsmatrix,
$M^*$	bezeichnet eine konjugiert komplexe Matrix M,
20 $M^T$	bezeichnet eine transponierte Matrix M,
$M^H$	bezeichnet eine konjugiert transponierte Matrix M (hermitesche Matrix),
$[M]_{ij}$	bezeichnet ein Element einer Zeile i und einer Spalte j einer Matrix M,
25 $\text{vec}(M)$	bildet aus Spalten einer Matrix M einen Vektor
$\otimes$	bezeichnet ein Kronecker Produkt, und

$\text{diag}(M) = \text{diag}(M)^T$  bildet eine Diagonalmatrix mit Elementen x auf der Diagonalen.

30

Beim MIMO-Funkkommunikationssystem wird eine Übertragung einer Trainingssequenz über einen Funkübertragungskanal mit weißem Rauschen am Empfänger modelliert durch:

$$Y = R_{\tilde{n}\tilde{n}}^{-0,5} HFS + R_{\tilde{n}\tilde{n}}^{-0,5} \tilde{N} = R_{\tilde{n}\tilde{n}}^{-0,5} HFS + N$$

5

Gleichung (1)

mit:

- |    |                          |   |
|----|--------------------------|---|
|    | $N_t$                    | als Trainingssequenzlänge,  |
| 10 | $M_{TX}$                 | als Anzahl der sendeseitigen Antennensysteme,   |
|    | $M_{RX}$                 | als Anzahl der empfangsseitigen Antennensysteme,  |
|    | $S$                      | als sendeseitige Trainingssequenzmatrix der Größe $M_{TX} \times N_t$ ,   |
|    | $F$                      | als lineare Matrix des sendeseitigen Vorfilters,  |
| 15 |                          | Größe $M_{TX} \times M_{TX}$ ,  |
|    | $H$                      | als Funkübertragungskanalmatrix mit korrelierten Funkkanalkoeffizienten, Größe $M_{TX} \times M_{RX}$ ,                   |
|    | $\tilde{N}$              | als gemessene empfangsseitige Rauschmatrix vor einem "Noise-Whitening"-Rauschfilter,                                      |
| 20 |                          | Größe $M_{RX} \times N_t$ ,   |
|    | $N$                      | als empfangsseitige Rauschmatrix mit weißem Rauschen nach dem "Noise Whitening"-Rauschfilter, Größe $M_{RX} \times N_t$ , |
| 25 | $R_{\tilde{n}\tilde{n}}$ | als geschätzte Rauschkovarianzmatrix gemäß Gleichung (5),   |
|    | $Y$                      | als gemessene, verrauschte, empfangsseitige Trainingssequenzmatrix, Größe $M_{RX} \times N_t$ .                           |

Bei orthogonalen Trainingssequenzen erfüllt die sendeseitige Trainingssequenzmatrix  $S$  folgende Bedingung einer diskreten Fouriertransformations-Matrix, kurz DFT-Matrix:

$$SS^H = S^H S = N_t \cdot I$$

5

Gleichung (2)

Zerlegt man die Rauschmatrix  $\tilde{N}$  in Spaltenvektoren mit:

10

$$\tilde{N} = [\tilde{n}_1, \dots, \tilde{n}_{N_t}]$$

Gleichung (3),

15 so ergibt sich die in Gleichung (1) genannte Rauschkovarianzmatrix  $R_{\tilde{n}\tilde{n}}$  als Erwartungswert  $E$  mit  $1 \leq i \leq N_t$  zu:

$$R_{\tilde{n}\tilde{n}} = E[\tilde{n}_i \tilde{n}_i^H]$$

20

Gleichung (4)

Die Kovarianzmatrix der Spalten der in Gleichung (1) genannten Rauschmatrix  $N$  nimmt für weißes gauß'sches Rauschen den  
25 Wert der Einheitsmatrix  $I$  an.

Im Folgenden wird eine Schätzung der Funkkanalkoeffizienten unter Verwendung des empfangsseitigen MMSE-Algorithmus und unter Verwendung des als bekannt vorausgesetzten Vorfilters  
30 betrachtet.



Dazu wird Gleichung (4) in Vektor-Schreibweise umgeformt:

$$\underbrace{vec(Y)}_y = \underbrace{((FS)^T \otimes R_{nn}^{-0,5})}_X \cdot \underbrace{vec(H)}_h + \underbrace{vec(N)}_n$$

$$y = X \cdot h + n$$

5

Gleichung (5),

mit  $h$ ,  $n$ ,  $y$  als Spaltenvektoren.

- 10 Besitzen die Spaltenvektoren  $h$ ,  $n$  die Kovarianzmatrizen  $R_{hh}$  und  $R_{nn}$ , so wird eine lineare MMSE-Kanalschätzung des Spaltenvektors  $h$  entsprechend einer aus der Druckschrift "Fundamentals of statistical signal processing volume 1 (estimation theory), Kay S. M., Prentice Hall, 1993, bekannten Gleichung durchgeführt.
- 15

Man erhält als Schätzwert für den Spaltenvektor  $h$ :

$$\hat{h} = (R_{hh}^{-1} + X^H R_{nn}^{-1} X)^{-1} X^H R_{nn}^{-1} y$$

- 20 Gleichung (6)

mit  $R_{hh}$  als Kovarianzmatrix des Spaltenvektors  $h$  und mit  $R_{nn}$  als Kovarianzmatrix des Spaltenvektors  $n$ .

- 25 Wie nachfolgend gezeigt wird, ist die Matrix  $X$  eine Funktion der Kovarianzmatrix  $R_{hh}$ . Bei weißem Rauschen entspricht die dem Spaltenvektors  $n$  zugeordnete Kovarianzmatrix  $R_{nn}$  der Einheitsmatrix  $I$ .
- 30 Aus der Druckschrift "Fading correlation and its effect on the capacity of multielement antenna systems", Shiu, Foschini, Gans, Kahn, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 48,

no.3, pp.502-513, March 2000, ist ein vereinfachtes Modell eines korrelierten MIMO-Funkübertragungskanal bekannt.

Dabei gilt beispielsweise für eine sowohl sendeseitige als auch empfangsseitige Korrelation von Antennensystemen bzw. von Funkübertragungskanälen für die Funkübertragungskanalmatrix  $H$ :

$$H = A^H H_W B$$

10 Gleichung (7)

$$A A^H = R_{Rx}$$

Gleichung (8)

$$B B^H = R_{Tx}$$

Gleichung (9)

15

mit:

$A A^H$  als Matrizenwurzel, definiert über  $R_{Rx}$ ,

$B B^H$  als Matrizenwurzel, definiert über  $R_{Tx}$ ,

20  $H_W$  als komplexe Funkübertragungskanal-Matrix mit gauß'schen Variablen einer Einheitsvarianz, Größe  $M_{Rx} \times M_{Tx}$ ,

$H$  als Funkübertragungskanalmatrix mit korrelierten Funkkanalkoeffizienten, Größe  $M_{Tx} \times M_{Rx}$ ,

$R_{Rx}$  als normierte empfangsseitige langzeitstabile Korrelationsmatrix mit Funkkanalkoeffizienten, Größe  $M_{Rx} \times M_{Rx}$ , und

25 mit

$R_{Tx}$  als normierte sendeseitige langzeitstabile Korrelationsmatrix mit Funkkanalkoeffizienten, Größe  $M_{Tx} \times M_{Tx}$ ,

Unter Verwendung des oben genannten Kanalmodells folgt:

$$R_{hh} = R_{Tx}^* \otimes R_{Rx}$$

30

Gleichung (10)

Mit dem gegebenen Kanalmodell wird ein mittlerer quadratischer Fehlerwert  $\varepsilon$  ("Mean Squared Error", MSE) abgeleitet:

$$\varepsilon = \text{tr}((R_{Tx}^*)^{-1} \otimes R_{Rx}^{-1} + N_t(F^*F^T \otimes R_{\tilde{n}\tilde{n}}^{-1}))^{-1}$$

5 Gleichung (11)

Dabei wurde Spur (bzw. „Trace“) mit „tr“ abgekürzt.

Unter der Voraussetzung, dass sendeseitig bzw. empfangsseitig statistische Informationen über Funkkanalkoeffizienten vorliegen, die in Gleichung (11) mit  $R_{Tx}$  bzw.  $R_{Rx}$  berücksichtigt werden, ist ein entsprechender Entwurf eines linearen Vorfilters  $F$  unter Berücksichtigung eines minimalen Fehlers  $\varepsilon$  durchführbar.

15

Nachfolgend wird eine additive Überlagerung mit weißem gauß'schen Rauschen am Empfänger betrachtet und eine geschlossene Lösung für den MMSE-Algorithmus abgeleitet.

20 Es gilt:

$$R_{\tilde{m}} = N_0 \cdot I$$

Gleichung (12),

25 mit  $N_0$  als Rauschleistung.

Daraus ergibt sich der Fehlerwert  $\varepsilon$  zu:

$$\varepsilon = \text{tr}((R_{Tx}^*)^{-1} \otimes R_{Rx}^{-1} + \frac{N_t}{N_0}(F^*F^T \otimes I))^{-1}$$

Gleichung (13).

30

Basierend auf dieser Gleichung wird nachfolgend das erfindungsgemäße Vorfilter für verschiedene Ausbreitungsszenarien entworfen.

- 5 Dabei wird einerseits durch die sendeseitige Vorfilterung, bzw. durch die optimale Anpassung der Trainingssequenzen an den Funkübertragungskanal, eine verbesserte Schätzung der Funkkanalkoeffizienten ermöglicht und andererseits wird bei einem vorgegebenen Fehlerwert  $\epsilon$  eine Verkürzung der sendeseitigen Trainingssequenzen ermöglicht.

Nachfolgend werden Eigenwert-Zerlegungen mit Eigenwerten  $\Lambda_{Rx}$  und  $\Lambda_{Tx}$  durchgeführt. Es gilt:

$$R_{Rx} = V_{Rx} \Lambda_{Rx} V_{Rx}^H$$

$$R_{Tx}^* = V_{Tx} \Lambda_{Tx} V_{Tx}^H$$

15

Gleichung (14)

mit

- $R_{Rx}$  als empfangsseitige Korrelationsmatrix,  
 20  $R_{Tx}$  als sendeseitige Korrelationsmatrix,  
 $V_{Rx}$  als Eigenvektoren ( $v_{R1}, v_{R2}, \dots, v_{R,MRx}$ ) der empfangsseitigen Korrelationsmatrix  $R_{Rx}$ ,  
 $V_{Tx}$  als Eigenvektoren ( $v_{T1}, v_{T2}, \dots, v_{T,MTx}$ ) der sendeseitigen Korrelationsmatrix  $R_{Tx}$ ,  
 25  $\Lambda_{Rx}$  als Eigenwerte ( $\Lambda_{R1}, \Lambda_{R2}, \dots, \Lambda_{R,MRx}$ ) der empfangsseitigen Korrelationsmatrix  $R_{Rx}$ , und mit  
 $\Lambda_{Tx}$  als Eigenwerte ( $\Lambda_{T1}, \Lambda_{T2}, \dots, \Lambda_{T,MTx}$ ) der sendeseitigen Korrelationsmatrix  $R_{Tx}$ .
- 30 Ein Eigenwert  $\Lambda_{Ti}$  ( $i=1, \dots, M_{Tx}$ ) mit zugeordnetem Eigenvektor  $V_{Ti}$  ( $i=1, \dots, M_{Tx}$ ) ist als so genannter "Langzeit-Eigenmode" des Funkübertragungskanals zu bezeichnen, da hier Langzeiteigenschaften bezüglich der Korrelation beschrieben sind. Ein

großer Eigenwert bezüglich einer mittleren zu übertragenden Leistung kennzeichnet somit einen starken Eigenmode.

Die sendeseitige Trainingssequenzmatrix  $S$  und die sendeseitigen Eigenvektoren  $V_{Tx}$  sind jeweils zeilenweise beschreibbar durch:

$$S = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_{M_{Tx}} \end{bmatrix} \quad V_{Tx}^* = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & \dots & v_{M_{Tx}} \end{bmatrix}$$

Gleichung (15)

Das erfindungsgemäße Vorfilter wird beschrieben durch:

$$F^* = V_{Tx} \Phi_f$$

Gleichung (16)

mit  $\Phi_f$  als Diagonalmatrix, durch die Sendeleistungen zu den Eigenmoden bzw. zu den zu übertragenden Trainingssequenzen zugeordnet werden.

Somit gilt für die Vorfilterung der Trainingssequenzen:

$$F \cdot S = V_{Tx}^* \Phi_f S$$

Gleichung (17)

Diese Gleichung beschreibt einerseits eine Leistungszuordnung zu den Trainingssequenzen, die mit Hilfe des Vektors  $\Phi_f$  durchgeführt wird, und andererseits ein Beamforming, das an den Trainingssequenzen mit Hilfe der Eigenvektoren  $V_{Tx}^*$  der sendeseitigen Korrelationsmatrix  $R_{Tx}$  durchgeführt wird.

Für eine Trainingssequenz  $s_k$  wird eine Folge von in einer Matrix  $T_k$  gegebenen Sendevektoren über die Sendeantennen abgestrahlt. Es gilt:

5

$$T_k = \Phi_k V s_k$$

für alle  $k$ .

#### Gleichung 18

- 10 Gleichung (18) ist interpretierbar als Beamforming von einer Trainingssequenz  $s_k$  mit einem Eigenvektor  $v_k$ , wobei der Trainingssequenz  $s_k$  eine Leistung  $\Phi_k$  zugeordnet wird.

Aus Gleichung (13) ergibt sich für den Fehlerwert  $\varepsilon$ :

15

$$\varepsilon = \text{tr}(\Lambda_{Tx}^{-1} \otimes \Lambda_{Rx}^{-1} + \frac{N_t}{N_0} (V_{Tx}^H F^* F^T V_{Tx} \otimes I))^{-1}$$

#### Gleichung (19)

- 20 Mit der Diagonalmatrix  $\Phi_f$  zur Sendeleistungszuordnung ergibt sich für den Fehlerwert  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \text{tr}(\Lambda_{Tx}^{-1} \otimes \Lambda_{Rx}^{-1} + \frac{N_t}{N_0} (\Phi_f \Phi_f^H \otimes I))^{-1}$$

#### Gleichung (20)

Nachfolgend wird in einem ersten Ausführungsbeispiel sowohl eine empfangsseitige als auch eine sendeseitige Korrelation der Antennensysteme bzw. der Funkübertragungskanäle betrachtet.

5

Eine Minimierung des Fehlerwerts  $\varepsilon$  aus Gleichung (20) wird mit Hilfe des sendeseitigen Vorfilters durchgeführt. Unter der Voraussetzung einer Leistungsbeschränkung folgt als Optimierungsproblem:

10

$$\min_{\Phi_f} \text{tr} (\Lambda_{Tx}^{-1} \otimes \Lambda_{Rx}^{-1} + \frac{N_t}{N_0} (\Phi_f \Phi_f^H \otimes I))^{-1}$$

(Gleichung 21),

15 wobei die Nebenbedingung der Leistungsbeschränkung bestimmt ist durch  $\rho$  mit:

$$\rho = \sum_{l=0}^{M_{Tx}} \Phi_{f,l}^2$$

Gleichung (22)

20 Die Minimierung des Fehlerwerts erfolgt unter Beachtung der Nebenbedingung durch numerische Berechnungs- und Optimierungsverfahren.

Nachfolgend wird in einem zweiten Ausführungsbeispiel eine lediglich sendeseitige Korrelation der Antennensysteme bzw. der Funkübertragungskanäle betrachtet. Dieses Beispiel beschreibt ein typisches Szenario in einem zellularen Funkkommunikationssystem mit einer freistehenden Sendeantennenanordnung.

In Matrix-Schreibweise folgt für Elemente der Diagonalmatrix  $\Phi_f$  :

$$\Phi_f = \left[ \frac{1}{M_{Tx}} \left( \left( \frac{N_t}{N_0} \right)^{-1} \text{tr}(\Lambda_{Tx}^{-1}) + \rho \right) \cdot I - \left( \frac{N_t}{N_0} \right)^{-1} \Lambda_{Tx}^{-1} \right]^{0,5}$$

10

Gleichung (23)

mit der Nebenbedingung, dass alle Elemente der Diagonalmatrix  $\Phi_f$  größer als 0 sind. Dies kann beispielsweise mit einem iterativen Verfahren sichergestellt werden.

Nachfolgend wird in einem dritten Ausführungsbeispiel eine lediglich empfangsseitige Korrelation von Antennensystemen betrachtet.

Es ergibt sich, dass alle Elemente der Diagonalmatrix  $\Phi_f$  kongruent sind. Es gilt:

$$\Phi_f = \rho / M_{Tx} I$$

25

Gleichung (24)

In diesem Spezialfall findet lediglich eine ungerichtete Übertragung ohne Beamforming statt.

30



## Patentansprüche

1. Verfahren zur Vorfilterung von Trainingssequenzen in einem Funkkommunikationssystem, bei dem zumindest sendeseitig  
5 eine aus mehreren Antennensystemen bestehende Antennenanordnung verwendet wird,
  - bei dem die Trainingssequenzen über ein Vorfilter den sendeseitigen Antennensystemen zur Abstrahlung zugeführt werden,
  - 10 - bei dem anhand empfangener Trainingssequenzen eine Kanalschätzung von Funkübertragungskanaleigenschaften, die durch räumliche Korrelationen beschrieben werden, durchgeführt wird, und
  - bei dem das Vorfilter in Abhängigkeit der räumlichen  
15 Korrelationen dimensioniert wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem das Vorfilter in Abhängigkeit der räumlichen Korrelationen derart dimensioniert wird, dass ein vorgegebener Fehlerwert eines zur Kanalschätzung verwendeten Algorithmus erreicht wird.  
20
3. Verfahren nach Anspruch 2, bei dem der empfangsseitige Fehlerwert als Minimalwert bei einer vorgegebenen Trainingssequenzlänge vorgegeben wird oder bei dem der vorgegebene Fehlerwert mittels einer Anpassung der Länge der Trainingssequenzen erreicht wird.  
25
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem empfangsseitig ein MSE-Algorithmus zur Kanalschätzung verwendet wird.  
30
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem durch das Vorfilter für jede Trainingssequenz ein Beamforming-Verfahren durchgeführt wird, indem durch das Vorfilter sowohl eine Leistungszuordnung als auch eine Antennensystemzuordnung zur Trainingssequenz erfolgt.  
35

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem durch das Vorfilter die Trainingssequenzen an die Funkübertragungskanaleigenschaften angepasst werden.

5 7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Vorfilterung der Trainingssequenzen anhand folgender Gleichung durchgeführt wird:

$$F \cdot S = V_{Tx}^* \Phi_f S$$

mit:

10 S als sendeseitiger Trainingssequenzmatrix,  
F als sendeseitiger Vorfiltermatrix,  
V<sub>Tx</sub> als Eigenvektoren einer langzeitstabilen sendeseitigen Korrelationsmatrix mit sendeseitigen Funkkanalkoeffizienten, und mit  
15  $\Phi_f$  als Diagonalmatrix zur Leistungszuordnung

8. Verfahren nach Anspruch 7, bei dem die Diagonalmatrix  $\Phi_f$  unter Berücksichtigung eines MSE-Fehlerwerts  $\varepsilon$  anhand folgender Formel gebildet wird:

$$\varepsilon = \text{tr}(\Lambda_{Tx}^{-1} \otimes \Lambda_{Rx}^{-1} + \frac{N_t}{N_0} (\Phi_f \Phi_f^H \otimes I))^{-1}$$

20

mit

N<sub>t</sub> als Trainingssequenzlänge,  
N<sub>0</sub> als Rauschleistung,  
I als Einheitsmatrix,  
25  $\Lambda_{Rx}$  als Eigenwerte einer empfangsseitigen langzeitstabilen Korrelationsmatrix mit empfangsseitigen Funkkanalkoeffizienten,  
 $\Lambda_{Tx}$  als Eigenwerte der sendeseitigen langzeitstabilen Korrelationsmatrix mit sendeseitigen Funkkanalkoeffizienten.  
30

9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, bei dem eine Minimierung des MSE-Fehlerwerts  $\varepsilon$  bei einer sendeseitigen und bei einer empfangsseitigen Korrelation von Funkübertragungskanälen bzw. Antennensystemen im Hinblick auf die Diagonalmatrix  $\Phi_f$  anhand folgender Formel durchgeführt wird:

$$\min_{\Phi_f} \text{tr} \left( \Lambda_{Tx}^{-1} \otimes \Lambda_{Rx}^{-1} + \frac{N_t}{N_0} (\Phi_f \Phi_f^H \otimes I) \right)^{-1}$$

wobei als Nebenbedingung eine Leistungsbeschränkung anhand folgender Formel bestimmt wird:

$$\rho = \sum_{l=0}^{M_{Tx}} \Phi_{f,l}^2$$

10

10. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, bei dem bei einer sendeseitigen Korrelation von Funkübertragungskanälen bzw. Antennensystemen für Elemente der Diagonalmatrix  $\Phi_f$  gilt:

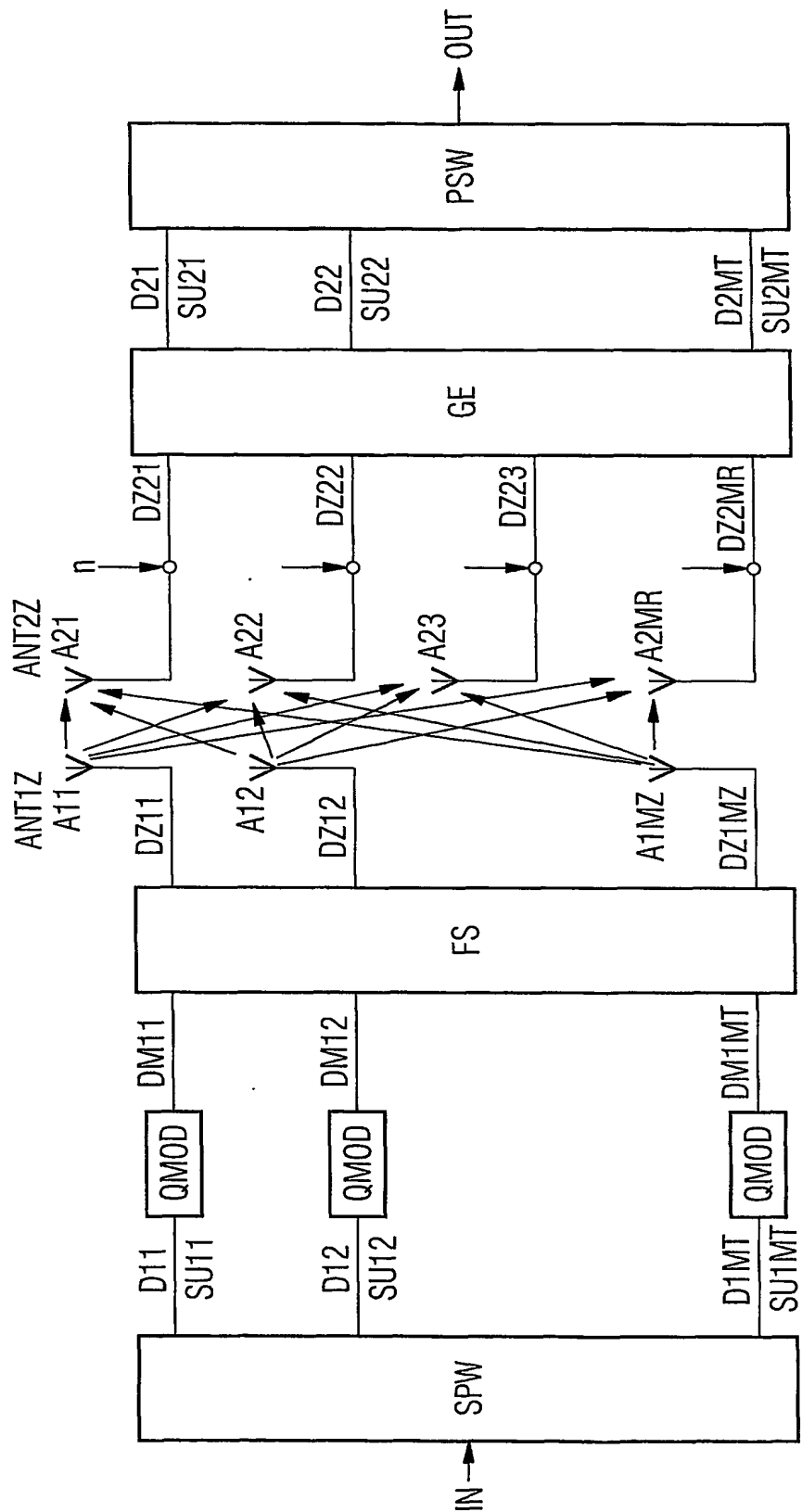
15

$$\Phi_{f,l} = \left[ \frac{1}{M_{Tx}} \left( \left( \frac{N_t}{N_0} \right)^{-1} \text{tr}(\Lambda_{Tx}^{-1}) + \rho \right) \cdot I - \left( \frac{N_t}{N_0} \right)^{-1} \Lambda_{Tx}^{-1} \right]^{0,5}$$

mit der Nebenbedingung  $\Phi_{f,1} \geq 0$ .

20

11. Sendestation und/oder Empfangsstation eines Funkkommunikationssystems mit Mitteln, die zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 10 ausgestaltet sind.



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No  
PCT/EP2004/051402

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 H04L25/03 H04L25/02

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 H04L

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, INSPEC, WPI Data, PAJ

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	<p>KIESSLING, M.; SPEIDEL, J.; GENG, N.; REINHARDT, M.: "Performance analysis of MIMO maximum likelihood receivers with channel correlation, colored gaussian noise, and linear prefiltering" ICC '03. IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, vol. 5, 11 May 2003 (2003-05-11), - 15 May 2003 (2003-05-15) pages 3026-3030, XP002270467 USA the whole document</p> <p style="text-align: center;">----- -/-</p>	1-11

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

### \* Special categories of cited documents:

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the international filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- \*T\* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- \*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- \*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- \* & \* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

27 September 2004

Date of mailing of the international search report

04/10/2004

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Koukourlis, S

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/EP2004/051402

## C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	<p>KIESSLING M ET AL: "Statistical prefiltering for MIMO systems with linear receivers in the presence of transmit correlation"  57TH IEEE SEMIANNUAL VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE. VTC 2003 (CAT. NO.03CH37431), JEJU, SOUTH KOREA, vol. 1, 22 April 2003 (2003-04-22), - 25 April 2003 (2003-04-25) pages 267-271, XP002270468  Piscataway, NJ, USA  ISBN: 0-7803-7757-5  the whole document</p>	1-11
X	<p>KIESSLING M ET AL: "Statistical prefiltering for MMSE and ML receivers with correlated MIMO channels"  WCNC 2003 IEEE WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE RECORD (CAT. NO.03TH8659), NEW ORLEANS, LA, USA, 16-20 MARCH 2003, vol. 2, 16 March 2003 (2003-03-16), - 20 March 2003 (2003-03-20) pages 919-924, XP002270469  Piscataway, NJ, USA  ISBN: 0-7803-7700-1  the whole document</p>	1-11
A	<p>WO 01/37442 A (GUSTRAU JOERG ;ULRICH THOMAS (DE); HOEYNCK ANDREAS (DE); KLEIN ANJ) 25 May 2001 (2001-05-25)  abstract  page 4, line 1 - line 26</p>	1-11
A	<p>SHENGLI ZHOU ET AL: "Subspace-based (semi-) blind channel estimation for block precoded space-time OFDM"  IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, MAY 2002, IEEE, USA, vol. 50, no. 5, May 2002 (2002-05), pages 1215-1228, XP002270470  ISSN: 1053-587X  abstract</p>	1-11

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/EP2004/051402

Patent document cited in search report		Publication date		Patent family member(s)	Publication date
WO 0137442	A	25-05-2001	DE	19955357 A1	09-08-2001
			AU	2350201 A	30-05-2001
			WO	0137442 A1	25-05-2001
<hr/>					

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2004/051402

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES  
IPK 7 H04L25/03 H04L25/02

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

## B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierte Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)  
IPK 7 H04L

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, INSPEC, WPI Data, PAJ

## C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie <sup>a</sup>	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	<p>KIESSLING, M.; SPEIDEL, J.; GENG, N.; REINHARDT, M.: "Performance analysis of MIMO maximum likelihood receivers with channel correlation, colored gaussian noise, and linear prefiltering" ICC '03. IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, Bd. 5, 11. Mai 2003 (2003-05-11), - 15. Mai 2003 (2003-05-15) Seiten 3026-3030, XP002270467 USA das ganze Dokument</p> <p style="text-align: center;">----- --/--</p>	1-11

☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☒ Siehe Anhang Patentfamilie

<sup>a</sup> Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

\*A\* Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

\*E\* älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

\*L\* Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

\*O\* Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

\*P\* Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

\*T\* Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

\*X\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

\*Y\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

\*Z\* Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

27. September 2004

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

04/10/2004

Name und Postanschrift der internationalen Recherchenbehörde  
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Koukourlis, S



## INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen  
PCT/EP2004/051402

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	<p>KIESSLING M ET AL: "Statistical prefiltering for MIMO systems with linear receivers in the presence of transmit correlation"</p> <p>57TH IEEE SEMIANNUAL VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE. VTC 2003 (CAT. NO.03CH37431), JEJU, SOUTH KOREA, Bd. 1, 22. April 2003 (2003-04-22), - 25. April 2003 (2003-04-25) Seiten 267-271, XP002270468</p> <p>Piscataway, NJ, USA</p> <p>ISBN: 0-7803-7757-5</p> <p>das ganze Dokument</p>	1-11
X	<p>KIESSLING M ET AL: "Statistical prefiltering for MMSE and ML receivers with correlated MIMO channels"</p> <p>WCNC 2003 IEEE WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE RECORD (CAT. NO.03TH8659), NEW ORLEANS, LA, USA, 16-20 MARCH 2003, Bd. 2, 16. März 2003 (2003-03-16), - 20. März 2003 (2003-03-20) Seiten 919-924, XP002270469</p> <p>Piscataway, NJ, USA</p> <p>ISBN: 0-7803-7700-1</p> <p>das ganze Dokument</p>	1-11
A	<p>WO 01/37442 A (GUSTRAU JOERG ;ULRICH THOMAS (DE); HOEYNCK ANDREAS (DE); KLEIN ANJ) 25. Mai 2001 (2001-05-25)</p> <p>Zusammenfassung</p> <p>Seite 4, Zeile 1 - Zeile 26</p>	1-11
A	<p>SHENGLI ZHOU ET AL: "Subspace-based (semi-) blind channel estimation for block precoded space-time OFDM"</p> <p>IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, MAY 2002, IEEE, USA, Bd. 50, Nr. 5, Mai 2002 (2002-05), Seiten 1215-1228, XP002270470</p> <p>ISSN: 1053-587X</p> <p>Zusammenfassung</p>	1-11

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2004/051402

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 0137442 A	25-05-2001	DE 19955357 A1	09-08-2001
		AU 2350201 A	30-05-2001
		WO 0137442 A1	25-05-2001
<hr/>			

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☒ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**